

АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРОМЕМБРАННОГО И ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРА НИТРАТА АММОНИЯ

С.И. Лазарев, С.В. Ковалев, Д.Н. Коновалов, О.А. Ковалева

Сергей Иванович Лазарев, Сергей Владимирович Ковалев*, Дмитрий Николаевич Коновалов, Ольга Александровна Ковалева

Кафедра механики и инженерной графики, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, Тамбов, Российская Федерация, 392000

E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, sseedd@mail.ru*, kdn1979dom@mail.ru, solomina-oa@yandex.ru

В работе представлен обобщенный анализ литературных данных по вольт-амперным, омическим характеристикам и электропроводности мембранных систем. На основе анализа литературы отмечается, что перспективным методом для разделения растворов производства нитрата аммония является электродиализ. Анализ литературных источников выявил, что наложение внешнего постоянного электрического поля на процесс мембранного разделения растворов, содержащих переносящие заряд компоненты (нитрат ионы и ионы аммония), вызывает направленный перенос катионов и анионов через мембраны. Проведенные исследования выявили, что при баромембранном разделении исследуемых растворов с ростом трансмембранного давления увеличивается удельный выходной поток. Это связано с возрастанием движущей силы процесса. Для прианодной мембраны ОФАМ-К с ростом плотности тока при электробаромембранном разделении раствора нитрата аммония происходит уменьшение удельного выходного потока, что связано с изменением величины рН подкисленного прианодного пермеата, а для прикатодной мембраны ОПМН-П отмечается увеличение удельного выходного потока при изменении величины рН подщелоченного прикатодного пермеата. В работе предложено модифицированное математическое уравнение для теоретического расчета удельного выходного потока и коэффициента задержания нанопористых мембран ОФАМ-К и ОПМН-П. Экспериментальные исследования мембранных систем, оснащенных прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами от напряжения и трансмембранного давления, выявили, что для водного раствора нитрата аммония отмечается два характерных периода на вольт-амперных, омических характеристиках и электропроводности мембранной системы (первый период - запредельный режим, диссоциация воды (H^+ и OH^-) на границе раздела фаз с появлением дополнительных переносчиков электрического тока, второй - деградация активного слоя полупроницаемой мембраны). При исследовании вольт-амперных характеристик мембранной системы, оснащенной прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении модельного и технологического растворов, отмечается уменьшение общего омического сопротивления системы, что связано с процессом дресселирования раствора.

Ключевые слова: нанопористая мембрана, разделение, кинетические характеристики, удельный выходной поток, коэффициент задержания

ANALYSIS OF KINETIC CHARACTERISTICS OF BAROMEMBRANE AND ELECTROBAROMEMBRANE SEPARATION OF AMMONIUM NITRATE SOLUTION

S.I. Lazarev, S.V. Kovalev, D.N. Kononov, O.A. Kovaleva

Sergey I. Lazarev, Sergey V. Kovalev*, Dmitry N. Kononov, Olga A. Kovaleva

Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya st., 106, Tambov, 392000, Russia

E-mail: sergey.lazarev.1962@mail.ru, sseedd@mail.ru*, kdn1979dom@mail.ru, solomina-oa@yandex.ru

The paper presents a generalized analysis of literature data on the current-voltage, omics characteristics and electrical conductivity of membrane systems. Based on an analysis of the literature, it is noted that electrodialysis is a promising method for the separation of solutions for the production of ammonium nitrate. An analysis of literature revealed that the application of an external constant electric field to the membrane separation of solutions containing charge-transporting components (nitrate ions and ammonium ions) causes the directed transfer of cations and anions through the membranes. The studies revealed that with the baromembrane separation of the studied solutions with increasing transmembrane pressure, the specific output stream increases. This is due to an increase in the driving force of the process. For the OFAM-K anode membrane, with an increase in the current density, with the electrobaromembrane separation of the ammonium nitrate solution, the specific output stream decreases, which is associated with a change in the pH value of the acidified anode permeate. nd for the OPMN-P cathode membrane, the specific output stream increases with a change in the pH of the alkalinized cathode permeate. A modified mathematical equation is proposed for theoretical calculation of the specific output stream and the retention coefficient of the OFAM-K and OPMN-P nanofiltration membranes. Experimental studies of membrane systems equipped with the anode OFAM-K and the near-cathode OPMN-P membranes from voltage and transmembrane pressure revealed that for the aqueous solution of ammonium nitrate there are two characteristic periods on the current-voltage, omics characteristics and electrical conductivity of the membrane system (the first period is beyond regime, dissociation of water (H^+ and OH^-) at the phase boundary with the advent of additional electric current carriers, the second is the degradation of the active layer of a semi-permeable membrane). When studying the current-voltage characteristics of a membrane system equipped with an anode OFAM-K and a near-cathode OPMN-P membranes, when separating model and technological solutions, a decrease in the total omics resistance of the system is observed, which is associated with the solution throttling process.

Key words: nanofiltration membrane, separation, kinetic characteristics, flux, rejection coefficient

Для цитирования:

Лазарев С.И., Ковалев С.В., Коновалов Д.Н., Ковалева О.А. Анализ кинетических характеристик баромембранного и электробаромембранного разделения раствора нитрата аммония. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 9. С. 28–36

For citation:

Lazarev S.I., Kovalev S.V., Konovalov D.N., Kovaleva O.A. Analysis of kinetic characteristics of baromembrane and electrobaromembrane separation of ammonium nitrate solution. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [Russ. J. Chem. & Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 9. P. 28–36

ВВЕДЕНИЕ

Широкое применение процессов электро-мембранного разделения технологических растворов в различных отраслях промышленности (химической, машиностроительной, биохимической и др.) ограничено необходимостью предварительной лабораторной проработки конкретных жидкостей, содержащих те или иные катионы и анионы. Например, содержание в технологических жидкостях, наряду с основными солями, солей жесткости (кальция и магния) накладывает определенные ограничения на применение процессов электро-мембранного разделения подобных растворов [1]. Особенно это актуально в технологических схемах производства минеральных удобрений.

Модельные жидкости с содержанием компонентов солей, подобных технологическим жид-

костям реальных промышленных производств, встречаются в процессах гальванопокрытий и производств минеральных удобрений.

В работе [2] представлены результаты исследований электродиализного разделения технологических жидкостей алкилароматической аминокислоты. В рассматриваемых концентрациях алкилароматической аминокислоты не наблюдается большого влияния на конечные параметры по неорганическим ионам, что подтверждается вольт-амперными характеристиками (ВАХ) анионообменных мембран. Несмотря на это, увеличение аминокислоты вносит изменения в длину плато на ВАХ из-за небольшого изменения мембраны в аминокислотную форму, которое уменьшает мембранную электропроводность и адсорбции ароматического соединения на поверхности. Замечено изменение зависимостей потоков алкиларомати-

ческой аминокислоты и зависимостей рН в секции большей концентрации со стороны анионообменной мембраны от плотности тока при электродиализе: максимальный поток фенилаланина (тирозина) и первый изгиб на ВАХ соответствует увеличению рН.

В литературе [3] описано изготовление композитных мембран на основе МФ-4СК и полианилина с анизотропной структурой и различными ВАХ в результате воздействия внешнего электрического поля. В итоге изучения поведения композитных мембран получено, что с возрастанием плотности тока при синтезе полианилина проводимость уменьшается, увеличивается гистерезис на циклической вольт-амперной кривой, растет асимметрия параметров ВАХ и появляется псевдопредельный ток, возникающий в связи с внутренней биполярной границей.

Исследованию электропроводности ионообменных отечественных и зарубежных мембран при обработке технологических растворов заданной концентрации посвящена работа [4]. Показаны теоретические оценки по электропроводности подобных мембран в широком диапазоне концентраций исследуемых жидкостей.

Электродиализ в опытных и промышленных производствах веществ для лекарственных средств и биопрепаратов [5] является перспективным и высоко эффективным в технических подходах к вопросам очистки получаемых реакционных растворов фармацевтических продуктов, требующих создания более экономичных, экологически чистых и интенсифицированных технологических процессов. Применение электродиализной технологии в производстве таурина позволило существенно модернизировать технологический процесс. Улучшение процесса очистки в производстве туберкулина и октанатриевой соли октакарбокситфаллоцианина кобальта возможно при электродиализе. Электродиализное получение аминоклевулиновой кислоты позволяет выделять дорогостоящий продукт из производственных растворов до 65-70%.

В источнике [6] приведены экспериментальные исследования массообменных характеристик пилотного модуля EDC-II/125 и лабораторной ячейки EDC-Y, которые применяются в технологической схеме по переработке сокового пара аммиачной селитры. На основе параметров, которые получены на лабораторной ячейке, с использованием метода компартиментации можно проектировать массообменные характеристики про-

мышленных электродиализаторов-концентраторов с гидравлически замкнутыми камерами концентрирования.

В работе [7] приведены итоги электродиализных экспериментов азотсодержащих сточных вод ОАО «Минудобрения» (г. Россошь, Воронежская обл.). В результате исследований определена проходимость ионов аммония и нитрат-ионов через ионообменные мембраны, получены энергетические характеристики процесса. Выведены оптимальные условия электродиализной очистки.

Электропроводность гетерогенных катионо- и анионообменных мембран МК-40 и МА-41 в растворе нитрата аммония при различных концентрациях рассмотрена в литературе [8]. Для проведения исследований был определен контактно-разностный метод замеров электросопротивления ионообменных мембран, позволяющий экспериментировать с малыми концентрациями внешнего равновесного раствора. Полученные электропроводности при низкой концентрации позволили определить коэффициенты диффузии ионов аммония и нитрат-ионов в мембранах. Также определены доли проводимости гелевой и межгелевой фаз при использовании микрогетерогенной двухфазной модели строения ионообменного материала.

Основу для определения микроструктуры неоднородных образцов составляет зависимость электропроводности ионообменных материалов при различных концентрациях. На расположение путей проводимости в композитном ионообменном материале влияет природа противоиона. Электропроводность гетерогенных катионо- и анионообменных мембран МК-40, МК-41, Ralex CM(H)-PP, МА-41, Ralex AM(H)-PP в растворах нитрата аммония, нитрата калия и хлорида аммония рассмотрена в литературе [9].

Результатом проведенных экспериментов работы [10] является схема, в которой предельное электрохимическое концентрирование и глубокая деминерализация КСП обеспечивается за счет использования электродиализаторов различной конструкции – электродиализаторы ЕБ-II производства АО «МЕГА» и насадочными электродиализаторами ЭДН-1 и ЭДН-2 производства «ООО «Инновационное предприятие «Мембранная технология», а процессы деминерализации и концентрирования проводятся в две ступени на трех группах указанных электродиализаторов. В итоге, с увеличением минерализации электролита и, в большей мере, с увеличением плотности тока повышается уровень минерализации концентрата. При электродиализе имеет место преимущественный пере-

нос аммиачной селитры по сравнению с гидроокисью аммония, что приводит к подщелачиванию раствора и играет положительную роль при нейтрализации азотной кислоты в периоды поступления на переработку кислого конденсата.

В настоящей работе был сделан упор на перспективность применения электробаромембран-

ных процессов разделения растворов (работающих при одновременном воздействии трансмембранного давления и плотности тока), где в качестве пористых мембран применяются нанопористые ОПМН-П, ОФАМ-К, рабочие характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие характеристики мембран типа ОФАМ-К, ОПМН-П
Table 1. Performance characteristics of OFAM-K, OPMN-P type membranes

Тип мембраны	Рабочие характеристики мембран				
	Рабочее давление, МПа	Минимальная производительность по воде, при T = 298 К, м ³ /м ² ·с	Коэффициент задержания по 0,15% NaCl, не менее	Рабочий диапазон pH	Максимальная температура, К
ОФАМ-К	3,0	2,22·10 ⁻⁵	0,95	2–12	323
ОПМН-П	1,6	2,77·10 ⁻⁵	0,55		

В связи с упомянутыми особенностями, целью работы было экспериментальное исследование и анализ кинетических, вольт-амперных, омических характеристик мембранных систем и электропроводности при разделении водного раствора, содержащего нитрат-ионы и ионы аммония.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперимент по исследованию кинетических и электрохимических характеристик мембранных систем проводился на электробаромембранной установке, представленной в литературе [11-14].

Удельный поток через мембранную перегородку рассчитывается по следующей зависимости [15-18]:

$$J = \frac{V}{F_m \cdot \tau}; \quad (1)$$

где V – объем собранного пермеата, м³; F_m – рабочая площадь мембраны, м²; τ – время проведения эксперимента, с.

Экспериментальное значение коэффициента задержания мембранной перегородки определяются по формуле [15, 19]:

$$K = 1 - \frac{c_{пер}}{c}, \quad (2)$$

где c , $c_{пер}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе и пермеате.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные зависимости удельного выходного потока от плотности тока при варьировании трансмембранного давления при разделении модельного и технологического раствора для мембран ОФАМ-К и ОПМН-П представлены на рис. 1-3.

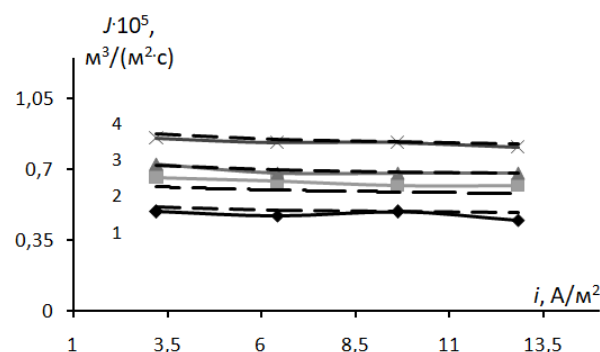


Рис. 1. Зависимости удельного выходного потока для прианодной ОФАМ-К мембраны при разделении водного раствора нитрата аммония ($c = 0,4 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P: 1 - 1,0 МПа; 2 - 1,2 МПа; 3 - 1,4 МПа; 4 - 1,7 МПа (сплошная линия - эксперимент; штриховая линия - расчет)

Fig. 1. Dependences of the specific output flow for the anode OFAM-K membrane upon separation of an aqueous solution of ammonium nitrate ($c = 0.4 \text{ kg/m}^3$) on the current density with varying transmembrane pressure P: 1 - 1.0 MPa; 2 - 1.2 MPa; 3 - 1.4 MPa; 4 - 1.7 MPa (solid line is an experiment; dashed line - calculation)

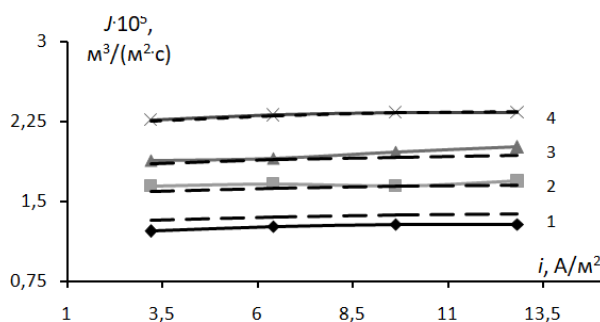


Рис. 2. Зависимости удельного выходного потока для прикатодной ОПМН-П мембраны при разделении водного раствора нитрата аммония ($c = 0,4 \text{ кг/м}^3$) от плотности тока с варьированием трансмембранного давления P: 1 - 1,0 МПа; 2 - 1,2 МПа; 3 - 1,4 МПа; 4 - 1,7 МПа (сплошная линия - эксперимент; штриховая линия - расчет)

Fig. 2. Dependences of the specific output flow for the near-cathode OPMN-P membrane upon separation of an aqueous solution of ammonium nitrate ($c = 0.4 \text{ kg/m}^3$) on the current density with varying transmembrane pressure P: 1 - 1.0 MPa; 2 - 1.2 MPa; 3 - 1.4 MPa; 4 - 1.7 MPa (solid line is an experiment; dashed line - calculation)

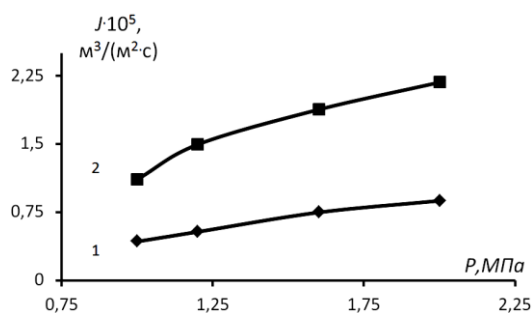


Рис. 3. Зависимости удельного выходного потока для мембран ОФАМ-К (1), ОПМН-П (2) при разделении технологического раствора производства нитрата аммония с концентрацией ионов NH_4^+ ($c = 1,358 \text{ мг/дм}^3$), NO_3^- ($c = 0,58 \text{ мг/дм}^3$) от трансмембранного давления

Fig. 3. Dependences of the specific output flow for OFAM-K (1), OPMN-P (2) membranes during separation of the technological solution for the production of ammonium nitrate with an ion concentration of NH_4^+ ($c = 1.358 \text{ mg/dm}^3$), NO_3^- ($c = 0.58 \text{ mg/dm}^3$) from transmembrane pressure

Проводя анализ зависимостей удельного выходного потока мембранной системы (рис. 1-3) при разделении водного раствора нитрата аммония, отмечается, что с ростом трансмембранного давления увеличивается удельный выходной поток. Это связано с возрастанием одной из движущих сил процесса баромембранного и электробаромембранного разделения исследуемых растворов.

Для прианодной мембраны ОФАМ-К с ростом плотности тока происходит уменьшение удельного выходного потока, что связано с изменением величины рН прианодного пермеата (его смещение в кислую среду), а для прикатодной мембраны ОПМН-П отмечается увеличение удельного выходного потока (изменение величины рН прикатодного пермеата, смещение в щелочную среду) и влиянием электроосмотического потока на процесс разделения исследуемых растворов.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных при мембранном разделении растворов производства минеральных удобрений, предложено модифицированное математическое уравнение для теоретического расчета удельного

выходного потока полупроницаемых мембран ОФАМ-К и ОПМН-П [20]:

$$J_{\text{расч}} = m \alpha_0 \Delta P \left(\frac{i}{i_{\text{пром}}} \right)^n \cdot \left(\frac{c}{c_{\text{макс}}} \right)^k, \quad (3)$$

где α_0 – коэффициент гидродинамической проницаемости для выбранного типа мембраны при максимальном паспортном давлении, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МПа})$; $\text{TMP} = \Delta P = P_{\text{изб.}} - P_{\text{ата}}$ – перепад рабочего давления, МПа; $c_{\text{макс}}$ – максимальная концентрация растворенного вещества для серии экспериментов, кг/дм^3 ; m , n , k – эмпирические коэффициенты; i – плотность тока при проведении эксперимента, А/м^2 ; $i_{\text{пром}}$ – плотность тока для промышленной установки (принимается характерной для электродиализных установок – 90 А/м^2 [21]).

Уравнение справедливо при баромембранном разделении растворов с условиями ($i \rightarrow 0$, $i_{\text{пром}} > 0$, $m > 0$, $k > 0$), а при электробаромембранном – ($i > 0$, $i_{\text{пром}} > 0$, $m > 0$, $k > 0$).

Для промышленного технологического раствора, с учетом его многокомпонентности, формула (3) примет вид:

$$J_{\text{расч}} = m \alpha_0 \Delta P \left(\frac{i}{i_{\text{пром}}} \right)^n \cdot \left(\frac{\sum c}{\sum c_{\text{макс}}} \right)^k, \quad (4)$$

где $\sum c$ – суммарная концентрация исследуемых катионов и анионов в промышленном растворе, мг/дм^3 ; $\sum c_{\text{макс}}$ – суммарная максимальная концентрация исследуемых катионов и анионов в промышленном растворе, мг/дм^3 .

Эмпирические коэффициенты m , n , k для уравнений (3), (4) процесса электробаромембранного и баромембранного разделения исследуемых растворов производства минеральных удобрений приведены в табл. 2.

Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания мембран ОФАМ-К и ОПМН-П процесса баромембранного разделения технологического раствора производства нитрата аммония при постоянном трансмембранном давлении ($P = 1,6 \text{ МПа}$) представлены в табл. 3.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты m , n , k для уравнений (3), (4) процесса электробаромембранного и баромембранного разделения исследуемых растворов

Table 2. The empirical coefficients m , n , k for equations (3), (4) of the process of electrobaromembrane and baromembrane separation of the studied solutions

Процесс разделения	Раствор	Мембрана	m	n	k
Электробаромембранный	Водный раствор нитрата аммония ($c = 0,4 \text{ кг/м}^3$)	ОФАМ-К (прианодная)	0,543	-0,042	1,636
		ОПМН-П (прикатодная)	1,870	0,029	0,200
Баромембранный	Промышленный раствор производства нитрата аммония	ОФАМ-К	1,076	-0,062	0,717
		ОПМН-П	1,085	-0,196	0,681

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту задержания мембран ОФАМ-К и ОПМН-П процесса баромембранного разделения технологического раствора производства нитрата аммония при постоянном трансмембранном давлении ($P = 1,6$ МПа) с концентрацией ионов NH_4^+ ($c = 1,358$ мг/дм³), NO_3^- ($c = 0,58$ мг/дм³)

Table 3. Experimental and calculated data on the retention coefficient of the OFAM-K and OPMN-P membranes of the process of baromembrane separation of a technological solution for the production of ammonium nitrate at constant transmembrane pressure ($P = 1.6$ MPa) with an ion concentration of NH_4^+ ($c = 1.358$ mg/dm³), NO_3^- ($c = 0.58$ mg/dm³)

Мембрана	P , МПа	Ион	K	$K_{\text{расч}}$
ОФАМ-К	1,6	NH_4^+	0,840	0,840
		NO_3^-	0,690	0,690
ОПМН-П		NH_4^+	0,635	0,635
		NO_3^-	0,269	0,269

На основе анализа экспериментальных данных, полученных при мембранном разделении растворов производства минеральных удобрений, предложено модифицированное математическое уравнение для теоретического расчета коэффициента задержания полупроницаемых мембран ОФАМ-К и ОПМН-П [20, 22]:

$$K_{\text{расч}} = q_1 \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{\text{расч}}} \right) \cdot \exp \left(\frac{P}{P_{\text{макс}}} \right) + q_2, \quad (5)$$

где q_1 и q_2 – эмпирические коэффициенты; $P_{\text{макс}}$ – максимальное давление при эксперименте, МПа; $\alpha_{\text{расч}} = J_{\text{расч}}/P$ – расчетный коэффициент гидродинамической проницаемости для выбранного типа мембраны при максимальном паспортном давлении, м³/(м²·с·МПа).

Уравнение справедливо при баромембранном и электробаромембранном разделении растворов с условиями ($\alpha_{\text{расч}} > 0$, $P_{\text{макс}} > 0$) [22].

Эмпирические коэффициенты q_1 , q_2 для уравнения (5) процесса баромембранного разделения исследуемого раствора производства минеральных удобрений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Эмпирические коэффициенты q_1 , q_2 для уравнения (5) процесса разделения исследуемого раствора
Table 4. The empirical coefficients q_1 , q_2 for equation (5) of the process of separation of the test solution

Процесс разделения	Раствор	Мембрана	ион	q_1	q_2
Баромембранный	Промышленный раствор производства нитрата аммония	ОФАМ-К	NH_4^+	-0,006	0,917
			NO_3^-	-0,019	0,916
		ОПМН-П	NH_4^+	0,098	0,469
			NO_3^-	-0,062	0,375

Вольт-амперные, омические характеристики и электропроводность системы, оснащенной прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами при разделении водного раствора нитрата аммония, рис. 4.

Экспериментальные исследования мембранных систем, оснащенных прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами (рис. 4 а-в), от напряжения и трансмембранного давления, выявили, что для модельного раствора нитрата аммония отмечается два характерных периода на вольт-амперных, омических характеристиках и электропроводности (первый период – запредельный режим, диссоциация воды (H^+ и OH^-) на границе раздела фаз с появлением дополнительных переносчиков электрического тока, второй – деградация активного слоя полупроницаемой мембраны).

С увеличением трансмембранного давления в диапазоне напряжения от 3 до 30 В при исследовании электрохимических характеристик мембранной системы, оснащенной прианодной

ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами (рис. 4 б), при разделении водного раствора нитрата аммония, отмечается уменьшение общего омического сопротивления системы, что связано с процессом дресселирования раствора.

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты по баромембранному и электробаромембранному разделению растворов производств минеральных удобрений выявили, что с ростом трансмембранного давления увеличивается удельный выходной поток. Это связано с возрастанием движущей силы процесса баромембранного разделения исследуемых растворов. Для прианодной мембраны ОФАМ-К с ростом плотности тока, при электробаромембранном разделении раствора нитрата аммония происходит уменьшение удельного выходного потока, что связано с изменением величины pH прианодного пермеата (его смещение в кислую среду), а для прикатодной мембраны ОПМН-П отмечается увеличение удельного выходного потока (измене-

ние величины pH прикатодного пермеата, смещение в щелочную среду) и влияние электроосмотического потока на процесс разделения исследуемых растворов.

На основе анализа экспериментальных данных, полученных при баромембранном и электробаромембранном разделении растворов производств минеральных удобрений, предложено модифицированное математическое уравнение для теоретического расчета удельного выходного потока и коэффициента задержания мембран ОФАМ-К и ОПМН-П.

Экспериментальные исследования мембранных систем, оснащенных прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами от напряжения и трансмембранного давления, выявили, что для водного раствора нитрата аммония отмечается два характерных периода на вольт-амперных, омических характеристиках и электропроводности мембранной системы (первый период - запредельный режим, диссоциация воды (H^+ и OH^-) на границе раздела фаз с появлением дополнительных переносчиков электрического тока, второй - деградация активного слоя полупроницаемой мембраны). При исследовании вольт-амперных характеристик мембранной системы, оснащенной прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении модельного и технологического растворов, отмечается уменьшение общего омического сопротивления системы, что связано с процессом дросселирования раствора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шапошник В.А., Васильева В.И., Григорчук О.В. Явления переноса в ионообменных мембранах. М.: МФТИ. 2001. 200 с.
2. Елисеева Т.В., Харина А.Ю. Особенности вольт-амперных и транспортных характеристик анионообменных мембран при электродиализе растворов, содержащих алкилароматическую аминокислоту и минеральную соль. *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 1. С. 74-80. DOI: 10.7868/S0424857015010041.
3. Лоза Н.В., Долгополов С.В., Кононенко Н.А., Андреева М.А., Коршикова Ю.С. Влияние поверхностного модифицирования перфторированных мембран полианилином на их поляризационное поведение. *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 6. С. 615-623. DOI: 10.7868/S0424857015060146.
4. Демина О.А., Фалина И.В., Кононенко Н.А. Модельное описание электропроводности ионообменных мембран в широком диапазоне концентраций раствора электролита. *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 6. С. 641-645. DOI: 10.7868/S0424857015060055.

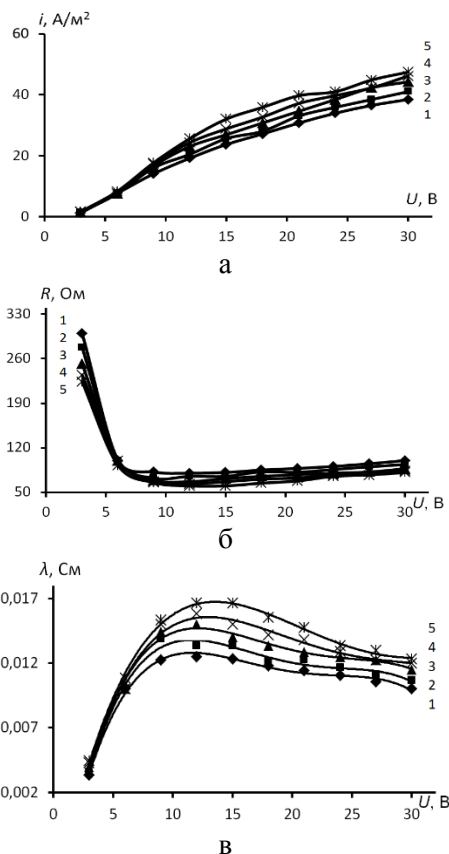


Рис. 4. Вольт-амперные (а), омические (б) характеристики и электропроводность (в) системы, оснащенной прианодной ОФАМ-К и прикатодной ОПМН-П мембранами, при разделении водного раствора нитрата аммония ($c = 0,4 \text{ кг/м}^3$) в зависимости от напряжения и трансмембранного давления P : 1 - 1,0 МПа; 2 - 1,2 МПа; 3 - 1,7 МПа; 4 - 2,0 МПа; 5 - 2,4 МПа

REFERENCES

1. Shaposhnik V.A., Vasilyeva V.I., Grigorchuk O.V. Transfer phenomena in ion-exchange membranes. M.: MFTI. 2001. 200 p. (in Russian).
2. Eliseeva T.V., Kharina A.Yu. Features of current-voltage and transport characteristics of anion-exchange membranes during electrodiagnosis of solutions containing alkyl aromatic amino acid and mineral salt. *Elektrokhimiya*. 2015. V. 51. N 1. P. 74-80 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857015010041.
3. Loza N.V., Dolgoplov S.V., Kononenko N.A., Andreeva M.A., Korshikova Yu.S. The effect of surface modification of perfluorinated membranes with polyaniline on their polarization behavior. *Elektrokhimiya*. 2015. V. 51. N 6. P. 615-623 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857015060146.
4. Demina O.A., Falina I.V., Kononenko N.A. Model description of the conductivity of ion-exchange membranes in a wide range of concentrations of an electrolyte solution. *Elektrokhimiya*. 2015. V. 51. N 6. P. 641-645 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857015060055.
5. Konarev A.A. The use of electrodiagnosis in the experimental and industrial production of pharmaceutical sub-

5. **Конарев А.А.** Использование электродиализа в опытном и промышленном производствах фармацевтических субстанций. *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 12. С. 1263-1274. DOI: 10.7868/S0424857015110055.
6. **Заболоцкий В.И., Мельников С.С., Демина О.А.** Прогнозирование массообменных характеристик промышленных электродиализаторов-концентраторов. *Электрохимия*. 2014. Т. 50. № 1. С. 38-44. DOI: 10.7868/S0424857014010101.
7. **Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б., Мальявина Ю.М.** Электродиализ в очистке азотсодержащих сточных вод предприятия по производству минеральных удобрений. *Хим. пром-ть сегодня*. 2014. № 7. С. 52-56.
8. **Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Власов Ю.Н., Ким К.Б., Матчина К.С.** Структурно-кинетические параметры ионообменных мембран МК-40 и МА-41 в растворах нитрата аммония. *Сорбцион. и хроматограф. процессы*. 2015. Т. 15. Вып. 5. С. 708-713.
9. **Нифталиев С.И., Козадерова О.А., Ким К.Б., Матчина К.С.** Изучение процесса переноса тока в системе гетерогенная ионообменная мембрана-раствор нитрата аммония. *Конденсир. среды и межфазн. границы*. 2016. Т. 18. № 2. С. 232-240.
10. **Заболоцкий В.И., Письменский В.Ф., Етеревскова С.И., Новак Л., Чернин А., Кысела В., Венцкунас В., Арлаускас Р.** Комплексная электродиализная технология переработки конденсата сокового пара производства аммиачной селитры. Материалы конференции: Ионный перенос в органических и неорганических мембранах. Электромембранные технологии на базе фундаментальных исследований явлений переноса. Краснодар: НИИ МЕМБРАН КубГУ. 2008. С. 109-111.
11. **Ковалев С.В.** Методика определения коэффициента гидродинамической проницаемости нанофильтрационной мембраны. *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. 2013. № 4. С. 20.
12. **Котельникова И.В., Головашин В.Л., Лазарев С.И.** Исследование кинетических характеристик мембранного разделения растворов, содержащих поверхностно-активные вещества и нефтепродукты. *Вестн. Тамбов. ун-та. Сер.: Естеств. и технич. науки*. 2012. Т. 17. № 2. С. 685-687.
13. **Абоносимов О.А.** Исследование гидродинамической проницаемости обратноосмотических мембран в растворах солей тяжелых металлов. *Вопр. современ. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского*. 2016. № 1 (59). С. 187-191. DOI: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.187-191.
14. **Ковалев С.В.** Экспериментальные исследования коэффициентов гидродинамической проницаемости пористых мембран в зависимости от градиента давления и температуры. *Химия и технология воды*. 2014. Т. 36. № 1. С. 1.
15. **Дыгнерский Ю.И.** Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия. 1978. 352 с.
16. **Лазарев С.И., Головашин В.Л., Полянский К.К., Мальцева О.Ю.** Исследование коэффициента задержания в процессе обратноосмотического разделения биологических растворов биохимических производств. *Вестн. Воронеж. гос. ун-та инженер. технологий*. 2015. № 2 (64). С. 204-208.
17. **Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К.** Исследование кинетических и структурных характеристик мембран в процессе электродиализной очистки медьсодержащих Растворов. *Изв. вузов. Химия и stances. *Elektrokhimiya**. 2015. V. 51. N 12. P. 1263-1274 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857015110055.
6. **Zabolotsky V.I., Melnikov S.S., Demina O.A.** Prediction of mass transfer characteristics of industrial electrodiализers-concentrators. *Elektrokhimiya*. 2014. V. 50. N 1. P. 38-44 (in Russian). DOI: 10.7868/S0424857014010101.
7. **Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B., Malyavina Yu.M.** Electrodiализ in the treatment of nitrogen-containing wastewater of a mineral fertilizer manufacturing company. *Khim. prom-t' segodnya*. 2014. N 7. P. 52-56 (in Russian).
8. **Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Vlasov Yu.N., Kim K.B., Matchina K.S.** Structural and kinetic parameters of МК-40 and МА-41 ion-exchange membranes in solutions of ammonium nitrate. *Sorbts. Khromatograf. Protsestry*. 2015. V. 15. N 5. P. 708-713 (in Russian).
9. **Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B., Matchina K.S.** Studying the current transfer process in a heterogeneous ion-exchange membrane-ammonium nitrate system. *Kondens. Sredy Mezhfazn. Granitsy*. 2016. V. 18. N 2. P. 232-240 (in Russian).
10. **Zabolotsky V.I., Pismensky V.F., Eterevskova S.I., Novak L., Chernin A., Kysela V., Ventskunas V., Arlauskas R.** Integrated electrodiализ technology for processing juice condensate from steam of ammonium nitrate production. Conference Materials: Ion transfer in organic and inorganic membranes. Electro-membrane technology based on fundamental research of transport phenomena. Krasnodar: NII MEMBRAN KubGU. 2008. P. 109-111 (in Russian).
11. **Kovalev S.V.** Method for determining the coefficient of hydrodynamic permeability of a nanofiltration membrane. *Khim. Neftegaz. Mashinostroenie*. 2013. N 4. P. 20 (in Russian).
12. **Kotelnikova I.V., Golovashin V.L., Lazarev S.I.** Investigation of the kinetic characteristics of membrane separation of solutions containing surfactants and oil products. *Vestn. Tambov. un-ta. Ser.: Estestv. Tekhnich. Nauki*. 2012. V. 17. N 2. P. 685-687 (in Russian).
13. **Abonosimov O.A.** Study of the hydrodynamic permeability of reverse osmosis membranes in solutions of salts of heavy metals. *Vopr. Sovremen. Nauki Praktiki. Un-t im. V.I. Vernadskogo*. 2016. N 1 (59). P. 187-191 (in Russian). DOI: 10.17277/voprosy.2016.01.pp.187-191.
14. **Kovalev S.V.** Experimental studies of the coefficients of hydrodynamic permeability of porous membranes depending on the pressure gradient and temperature. *Khim. Tekhnol. Vody*. 2014. V. 36. N 1. P. 1 (in Russian).
15. **Dytnersky Yu.I.** Reverse osmosis and ultrafiltration. М.: Khimiya. 1978. 352 p. (in Russian).
16. **Lazarev S.I., Golovashin V.L., Polyansky K.K., Maltseva O.Yu.** The study of the retention coefficient in the process of reverse osmosis separation of biological solutions of biochemical industries. *Vestn. Voronezh. Gos. Un-ta Inzhener. Tekhnol.* 2015. N 2 (64). P. 204-208 (in Russian).
17. **Shestakov K.V., Lazarev S.I., Polyanskiy K.K.** Study of kinetic and structural characteristics of membranes in purification process of copper-containing solutions by electrodiализis. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 7. P. 65-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196207.5827.
18. **Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Khorokhorina I.V., Kovalev S.V., Levin A.A.** Kinetic and structural characteris-

- хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 65-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196207.5827.
18. **Лазарев С.И., Головин Ю.М., Хорохорина И.В., Ковалев С.В., Левин А.А.** Кинетические и структурные характеристики ультрафильтрационных мембран при разделении растворов, содержащих лаурилсульфат натрия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 10. С. 89-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20196210.6031.
 19. **Свитцов А.А.** Введение в мембранную технологию. М.: ДеЛи принт. 2007. 208 с.
 20. **Головашин В.Л., Лазарев С.И., Лавренченко А.А.** Исследование кинетических коэффициентов электро-ультрафильтрационного разделения промышленных растворов биохимических производств. *Вестн. Тамбов. гос. техн. ун-та.* 2014. Т. 20. № 1. С. 86-94.
 21. **Гребенюк В.Д.** Электродиализ. Киев: Техника. 1976. 160 с.
 22. **Ковалева О.А.** Расчет технологических и конструктивных характеристик нанофильтрационного и электро-нанофильтрационного аппарата плоскокамерного типа. *Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и технич. науки.* 2017. Т. 22. Вып. 5. С. 1154-1160. DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1154-1160.
- tics of ultrafiltration membranes during the separation of solutions containing sodium lauryl sulfate. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 10. P. 89-95. DOI: 10.6060 / ivkkt.20196210.6031.
19. **Svitsov A.A.** Introduction to membrane technology. M.: DeLi print. 2007. 208 p. (in Russian).
 20. **Golovashin V.L., Lazarev S.I., Lavrenchenko A.A.** Study of kinetic coefficients of electro-ultrafiltration separation of industrial solutions of biochemical industries. *Vestn. Tambov. Gos. Tekhn. Un-ta.* 2014. V. 20. N 1. P. 86-94 (in Russian).
 21. **Grebenyuk V.D.** Electrodialysis. Kiev: Tekhnika. 1976. 160 p. (in Russian).
 22. **Kovaleva O.A.** Calculation of technological and design characteristics of nanofiltration and electron-filtration apparatus of the chamber type. *Vestn. Tambov. Un-ta. Ser.: Estestv. Tekhnich. Nauki.* 2017. V. 22. N 5. P. 1154-1160 (in Russian). DOI: 10.20310/1810-0198-2017-22-5-1154-1160.

*Поступила в редакцию 20.01.2020
Принята к опубликованию 26.03.2020*

*Received 20.01.2020
Accepted 26.03.2020*